

## **CAPÍTULO 6**

### **SUELOS Y ESTRUCTURAS**

#### **6.1 PERIODOS DE SUELOS OBSERVADOS EN MEDICIONES EN EDIFICIOS**

En el estudio de periodos fundamentales de edificios de Barcelona se utilizó un registrador de un canal colocado en la parte superior de los edificios y se usó el ruido cultural como fuente de excitación. El periodo fundamental de las estructuras se identificó en el espectro de Fourier de la aceleración medida y esta identificación se realizó antes de conocer el periodo del suelo.

Cuando se intentó correlacionar los periodos predominantes de los suelos (Alfaro et al., 1998) con los fundamentales de los edificios, se observó que en algunos espectros el periodo predominante del suelo también aparecía junto con las frecuencias del edificio (Espinoza et al 1998 c). Datos de los edificios estudiados que presentan esta característica están en la Tabla 6.1 que además incluye los periodos predominantes del suelo (columna PS) obtenidos en estudios de microzonificación usando el método de Nakamura (Barbat et al, 1996, Gutiérrez, 1996; López, 1996; Alfaro, 1997; Alfaro et al, 1998). Estos periodos detectados corresponden a los suelos más cercanos al edificio y en la mayoría de los casos se dan diferentes periodos cercanos por lo que se pone un intervalo de periodos dentro del cual debe estar el periodo predominante del suelo. También aparecen en dicha tabla los periodos fundamentales del edificio en las direcciones longitudinal (PL) y transversal (PT), el periodo predominante del suelo cuando está claramente identificado en el registro del edificio (PSE), y cuando no es claro, el probable periodo del suelo en ese registro (PPSE). Además se muestra la tipología constructiva (T) y el número de niveles de cada edificio (N).

#### **6.2 RESULTADOS DE LAS OBSERVACIONES EN LOS EDIFICIOS**

De la relación entre la respuesta del suelo y el periodo del edificio, se deducen tres casos. El primero se produce cuando el periodo predominante del suelo es claramente mayor que el periodo fundamental del edificio, el segundo cuando ambos son similares y el último cuando éste es claramente menor.

- 1.- periodo del suelo  $>$  periodo del edificio
- 2.- periodo del suelo  $\approx$  periodo del edificio
- 3.- periodo del suelo  $<$  periodo del edificio

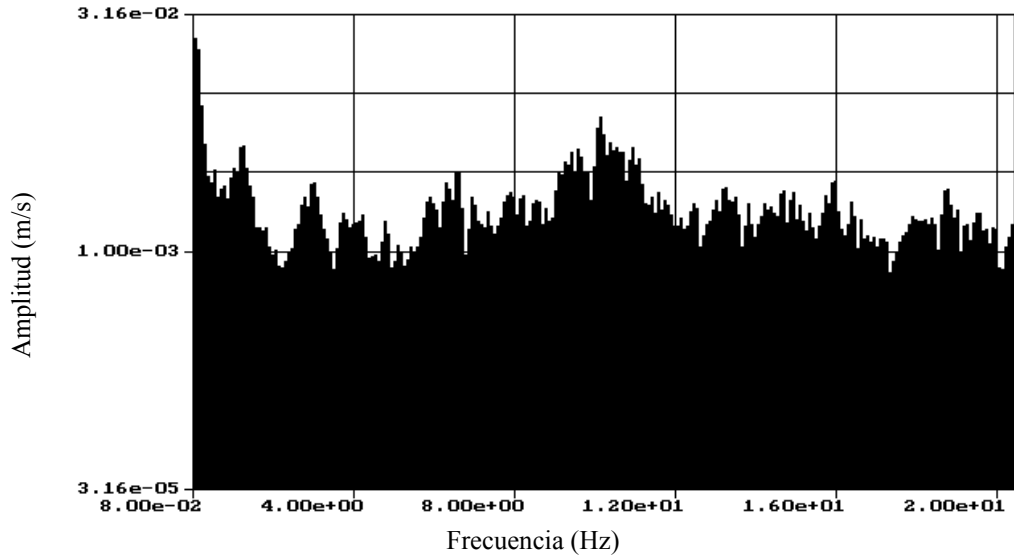
En la Figura 6.1 se ejemplifica el caso 1 mediante el espectro de Fourier del edificio N. 27. El periodo del suelo es 0.83 s y los del edificio son 0.29 y 0.33 s, longitudinal y transversal respectivamente.

ID	T	N	P <sub>I</sub>	P <sub>T</sub>	PS	PSE	PPSE
14	H	6	0.28	0.28	0.00-0.80		1.00
20	M	6	0.19	0.22	0.07-1.43		0.48
21	M	6	0.28	0.29	0.90-1.10	0.89	
26	M	8	0.30	0.39	1.00-1.25	0.89	
27	M	8	0.29	0.33	1.00-1.25	0.83	
28	M	8	0.48	0.48	0.06-0.50		0.80
29	M	9	0.36	0.30	1.11	1.00	
39	H	10	0.40	0.40	0.90-1.67		2.75
41	H	10	0.36	0.28	0.33-0.90		1.90
43	H	12	0.57	0.60	0.70-1.00		0.96-1.11
51	M	5	0.28	0.27	0.83-1.67	0.96	
52	M	8	0.38	0.50	0.50-1.25	1.10	
68	H	10	0.29	0.39	0.80-1.23	0.89	
79	H	4	0.33	0.19	0.14-0.20		0.20
88	MC	8	0.27	0.31	0.50-1.00		0.46-1.56
89	H	9	0.37	0.29	0.67-1.00		1.25-1.80
101	H	8	0.40	0.34	0.14-0.33		0.24-0.26
102	M	4	0.28	0.24	0.14-0.33		0.34-0.32
104	H	4	0.32	0.28	0.14-0.33		0.54
105	H	7	0.45	0.45	0.14-0.33		0.27-0.36
106	H	4	0.23	0.39	0.14-0.33		0.27-0.28
108	M	6	0.21	0.18	0.83-1.25		0.74
112	H	4	0.26	0.26	0.60-1.35		0.74
113	H	4	0.17	0.22	1.35	0.78	
115	H	6	0.38	0.37	0.29-0.33		0.50
116	H	5	0.35	0.25	0.06-1.10		1.00-1.14
125	M	3	0.16	0.23	0.67	0.67	
127	M	1	0.10	0.12	0.50		0.42-0.43

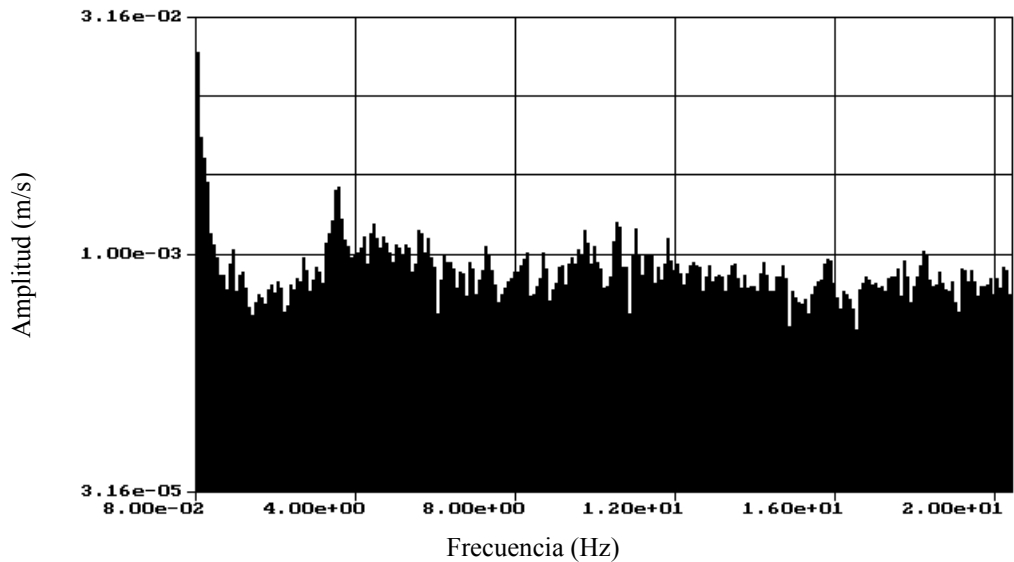
**Tabla 6.1** Periodo propio de 28 edificios de Barcelona y periodo predominante de los suelos. Al medirse la aceleración en estos edificios se observó el periodo del suelo.

El segundo caso donde los periodos del edificio y del suelo son similares, es el más complicado (Figura 6.2). En este caso, especialmente cuando la medición de la respuesta del suelo no se realiza cerca del edificio, la identificación del periodo predominante del suelo en las medidas realizadas en el edificio llega a ser realmente difícil.

En el último caso la frecuencia del edificio es la menor y la frecuencia del suelo es difícil de observar debido a que se puede confundir con un modo de vibración superior del edificio. La Figura 6.3 muestra el espectro de respuesta del edificio 79 donde la frecuencia fundamental se observa claramente (3.04 Hz). En este ejemplo, comparando la respuesta esperada del suelo y el espectro de Fourier del edificio, parece que el periodo del suelo podría ser la frecuencia del tercer pico (4.96Hz).



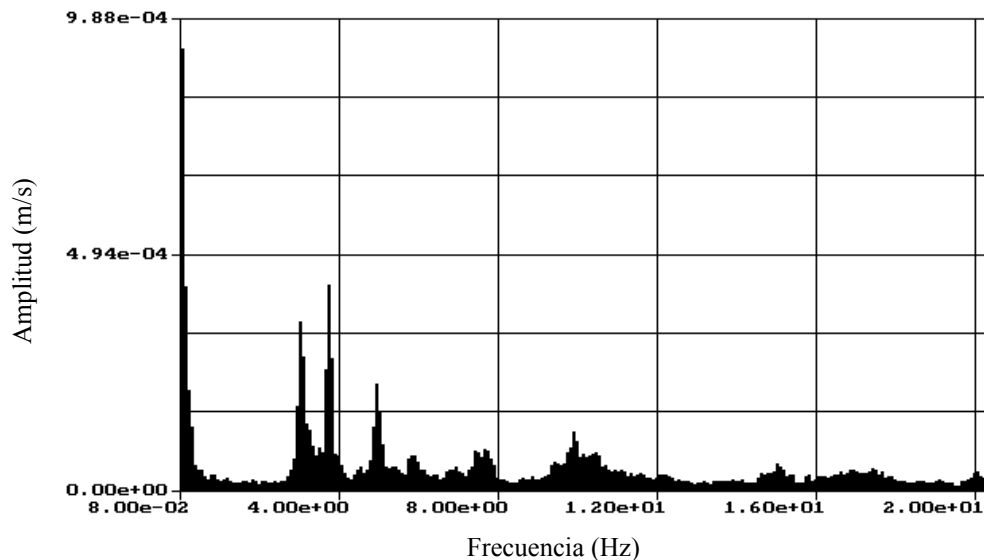
**Figura 6.1** Espectro de Fourier de la aceleración medida en el edificio 27, componente transversal. El periodo predominante del suelo es mayor que el fundamental del edificio (frecuencia del suelo menor que la del edificio). Se observan con claridad las frecuencias del suelo 1.2 Hz y la del edificio 3.03 Hz.



**Figura 6.2** Espectro de Fourier de la aceleración medida en el edificio 14 (componente transversal). El periodo predominante del suelo es similar que el fundamental del edificio. Se observa con claridad la frecuencia del edificio de 3.57 Hz. La frecuencia probable correspondiente al suelo se identifica en 1 Hz.

Después de hacer una revisión de los periodos propios de las estructuras considerando la respuesta del suelo, sólo tres periodos de edificios se han corregido al considerar que su identificación fue incorrecta ya que se consideró el periodo observado en el espectro de Fourier de la aceleración medida en el edificio como el periodo fundamental

del mismo, siendo que era el periodo predominante del suelo. Por ejemplo, el edificio 104 (Figura 6.4) tiene características especiales que hacen difícil apreciar el posible intervalo de frecuencias de su periodo fundamental. Inicialmente, el valor asociado al primer pico del espectro de Fourier, 0.54 s, se supuso el periodo del edificio. Este periodo era alto para un edificio de hormigón armado de cuatro niveles de Barcelona. Después de la comparación con la respuesta del suelo, no quedó clara la identificación por lo que se midió la respuesta del suelo junto al edificio y se encontró un pico de 1.44 Hz (0.69 s). Esta medida del espectro del suelo se hizo a unos cien metros de donde midieron Alfaro et al (1998) la respuesta del suelo (0.33 s). El nuevo periodo fundamental asignado a este edificio es más cercano al correspondiente a la fórmula encontrada para periodos de edificios de la ciudad. Las discrepancias entre el periodo medido cerca del edificio y el medido en los trabajos de zonificación sísmica, puede ser debida a variaciones de pequeña escala en los suelos cercanos al edificio.

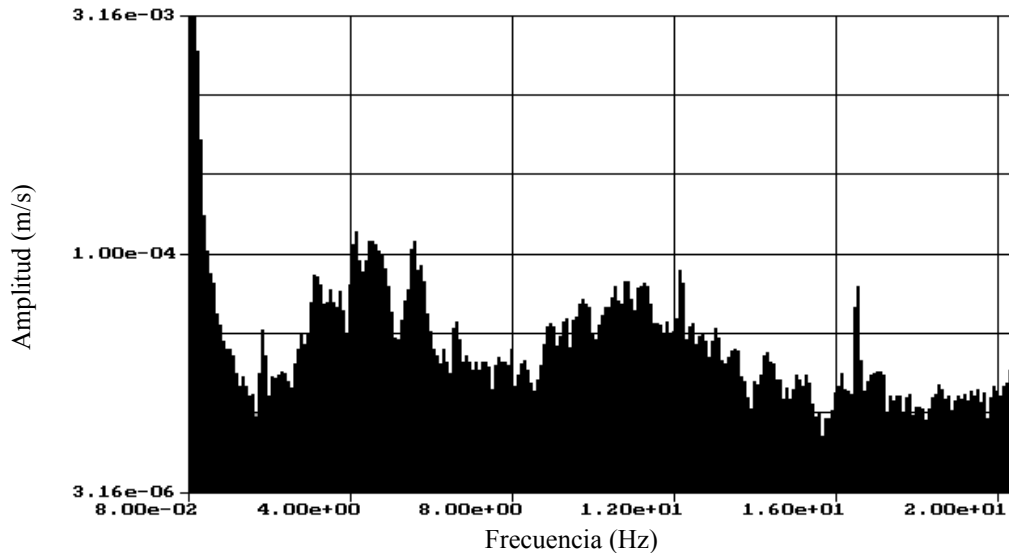


**Figura 6.3** Espectro de Fourier de la aceleración medida en el edificio 79 (componente longitudinal). El periodo predominante del suelo es menor que el fundamental del edificio (frecuencia del suelo mayor que la del edificio). Se observa con claridad la frecuencia del edificio (3.04 Hz). La frecuencia predominante del suelo podría corresponder 4.96 Hz.

### 6.3 CONCLUSIONES DE LAS OBSERVACIONES EN EDIFICIOS

En los espectros de Fourier de los registros de aceleración de algunos edificios se aprecia claramente un pico cuyo valor está asociado con el periodo predominante del suelo. Sin embargo, este hecho no aparece en la mayoría de los registros. Se han encontrado edificios localizados en diferentes tipos de suelos donde el periodo predominante del suelo no aparece en el espectro de Fourier del edificio. También, hay edificios mostrando la respuesta del suelo mientras otros, en el mismo tipo de suelo, no la muestran. Así, no hay características del suelo o el edificio que permitan predecir la existencia de la frecuencia predominante de la respuesta del suelo en la respuesta del edificio. Una explicación posible a este fenómeno es la excitación del suelo por el paso de trenes subterráneos, hecho que no

sucede en el estudio de microzonificación del suelo ya que se realizó en un horario nocturno de no funcionamiento de este servicio público y nivel de tráfico mínimo, mientras que las mediciones en edificios se realizaron en un horario diurno.



**Figura 6.4** Espectro de Fourier de la aceleración medida en el edificio 104. El periodo fundamental de este edificio fue recalculado.

Cuando se usa un equipo con un solo canal, es conveniente comparar el espectro de respuesta de Fourier del edificio con la respuesta del suelo para asegurar que se escogió correctamente el periodo fundamental del edificio. En este trabajo, la comparación entre la respuesta del suelo y el espectro de respuesta del edificio permite asegurar que los periodos asignados a los edificios son correctos. Solamente los periodos de tres edificios se cambiaron debido a la interpretación del valor de ese pico como una respuesta del suelo.

Cuando se usa un equipo de dos o más canales y se calcula la función de transferencia, contando con condiciones óptimas que permitan afirmar que el registro en la base del edificio es la entrada, esa comparación no es necesaria. Sin embargo, hemos visto que en general, el cociente entre las señales en la terraza de un edificio y en el suelo inmediato exterior, no suele ser un buen estimador de la función de transferencia, debido a la existencia de otras excitaciones externas e internas al edificio. Observándose generalmente bien la frecuencia propia del edificio a partir de medidas de un solo canal en la parte alta de un edificio. Con todo este hecho es importante para grandes trabajos como en los que se pretende obtener una fórmula empírica de periodos fundamentales de edificios, especialmente si se tienen datos de periodos de suelos.

#### **6.4 ESTIMACIÓN DEL EFECTO SUELO-ESTRUCTURA**

En este trabajo se aplica el método descrito por Safina (1996) que permite usar los periodos fundamentales obtenidos a partir de un equipo de un solo canal, sin registro en

campo libre y utilizando ruido cultural como fuente de vibración. El método consiste en calcular un parámetro de rigidez relativa suelo-estructura definido como un indicador del grado de importancia de los efectos de interacción

$$\varphi = \frac{h}{V_s P}$$

La velocidad de onda  $s$  ( $V_s$ ) se obtiene de Cid (1999 y comunicación personal) presentándose estos datos más el valor de  $\varphi$  (rigidez relativa) en la Tabla 6.2. No se utilizan los valores de  $V_s$  de sitios que están alejados más de 500 m de un edificio.

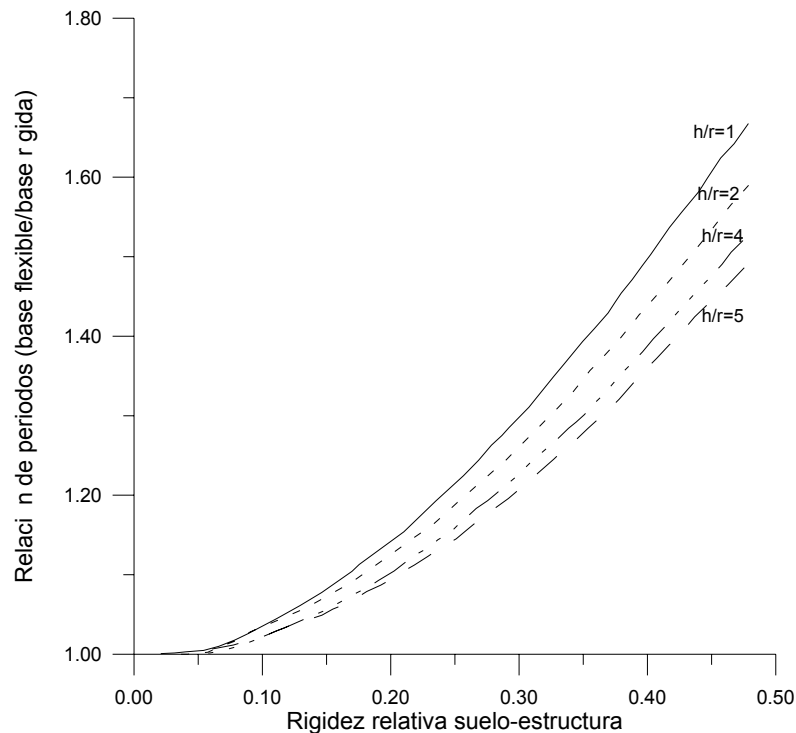
En la Figura 6.5 se aprecia la relación entre el parámetro  $\varphi$  y la existencia del efecto de interacción suelo-estructura ya que si no existiera éste, el cociente de los periodos fundamentales de un edificio con base flexible y con base rígida sería la unidad. Del estudio de Safina (1996) se desprende que existe el efecto de interacción suelo-estructura cuando  $\varphi > 0.1$ . El manual de Diseño de Obras Civiles de CFE (1993) justifica tomar en cuenta este efecto cuando  $\varphi > 0.05$ . Estos valores son rebasados para todos los edificios de la Tabla 6.2 por lo que se concluye que existe un considerable efecto de interacción suelo-estructura para edificios de Barcelona ya que el valor mínimo es  $\varphi = 0.14$ . Es necesario aclarar que los valores de la Figura 6.5 corresponden a edificios con características particulares de esbeltez.

ID	h	P <sub>L</sub>	P <sub>T</sub>	V <sub>s</sub>	φ(P <sub>L</sub> )	φ(P <sub>T</sub> )
15	17.75	0.26	0.31	274	0.25	0.21
17	26.00	0.21	0.32	274	0.45	0.30
27	28.00	0.29	0.33	251	0.38	0.34
30	27.60	0.52	0.52	315	0.17	0.17
41	30.35	0.36	0.28	216	0.39	0.50
111	14.60	0.29	0.17	274	0.18	0.31
113	17.20	0.17	0.22	162	0.62	0.48
116	9.15	0.35	0.25	193	0.14	0.19
124	24.54	0.40	0.40	210	0.29	0.29

**Tabla 6.2** Evaluación del parámetro  $\varphi$  para los edificios ID utilizando la altura, la velocidad de onda  $s$ , y valores de periodo fundamental medidos en las direcciones longitudinal y transversal.

Cuando  $\varphi > 0.2$  el periodo del edificio con base flexible es mayor del 10% que aquel con base rígida y este valor también es rebasado por la mayoría de los edificios.

Para complementar este trabajo se requiere tener valores de velocidad de onda  $s$  cercanos a cada edificio y además que correspondan a una profundidad similar a la dimensión de la base del edificio. Posteriormente se debe cuantificar esta interacción existente.



**Figura 6.5** Gráfica de la relación de los periodos de un edificio de base flexible a base rígida en función del parámetro de rigidez relativa del suelo-estructura ( $\phi$ ). Se presentan cuatro curvas para diferentes relaciones de esbeltez (altura  $h$  entre radio  $r$ ), considerando edificios de 12, 24, 48 y 60 metros de altura con un radio de 12 metros (Safina, 1996).

## 6.5 EXTRAPOLACIÓN DEL CÁLCULO DE $\phi$ A EDIFICIOS DE BARCELONA

Con el objetivo de analizar la importancia de los efectos de interacción suelo-estructura en la ciudad de Barcelona, se seleccionó una muestra de edificios, correspondiente a 6 manzanas de l'Eixample, de forma que fuera posible evaluar el parámetro de rigidez relativa  $\phi$  (Espinoza et al. 1999). Para ello se utilizaron las fórmulas deducidas en el Capítulo 5 (Tabla 5.4) y las determinaciones de las velocidades de las ondas de cizalla de Cid (1999) o interpolaciones consistentes con éstas. Las 6 manzanas se eligieron de forma que distaban, como mucho, 100 metros de al menos 3 puntos de los que se dispone de valores de la velocidad de la onda  $s$ . La información sobre la altura y número de niveles se obtuvo a partir de la base de datos sobre los edificios facilitada por el Ayuntamiento y gestionada por Mena (1999). Para el cálculo de la altura se supuso una altura media de cada nivel de 2.93 metros para edificios de hormigón y de 3.44 m para edificios de mampostería.

Tanto los datos utilizados como los resultados obtenidos se presentan en las Tablas 6.3 y 6.4. En total se seleccionaron 122 edificios, 40 de hormigón armado y 82 de mampostería.

manzana	edificio	N	h	P	Vs	rigidez relativa
830	5	9	26.37	0.37	175	0.41
830	7	10	29.30	0.41	175	0.41
830	14	5	14.65	0.18	175	0.46
830	15	10	29.30	0.41	175	0.41
830	16	10	29.30	0.41	175	0.41
830	21	7	20.51	0.27	175	0.43
840	20	10	29.30	0.41	150	0.47
840	24	3	8.79	0.09	150	0.65
840	28	2	5.86	0.04	150	0.89
870	5	5	14.65	0.18	200	0.40
870	12	10	29.30	0.41	200	0.36
870	13	4	11.72	0.14	200	0.43
900	1	9	26.37	0.37	225	0.32
900	2	9	26.37	0.37	225	0.32
900	3	7	20.51	0.27	225	0.33
900	4	7	20.51	0.27	225	0.33
900	5	10	29.30	0.41	225	0.32
900	11	10	29.30	0.41	225	0.32
900	14	10	29.30	0.41	225	0.32
900	19	7	20.51	0.27	225	0.33
900	20	7	20.51	0.27	225	0.33
900	21	10	29.30	0.41	225	0.32
900	22	9	26.37	0.37	225	0.32
900	26	7	20.51	0.27	225	0.33
900	27	10	29.30	0.41	225	0.32
920	1	10	29.30	0.41	250	0.28
920	6	9	26.37	0.37	250	0.29
920	7	10	29.30	0.41	250	0.28
920	8	10	29.30	0.41	250	0.28
920	13	7	20.51	0.27	250	0.30
920	14	7	20.51	0.27	250	0.30
920	15	7	20.51	0.27	250	0.30
920	16	7	20.51	0.27	250	0.30
920	19	9	26.37	0.37	250	0.29
920	23	8	23.44	0.32	250	0.29
920	25	8	23.44	0.32	250	0.29
920	27	8	23.44	0.32	250	0.29
930	13	3	8.79	0.09	250	0.39
930	25	7	20.51	0.27	250	0.30
930	27	4	11.72	0.14	250	0.34

**Tabla 6.3** Edificios de hormigón armado de Barcelona a los que se les calculó el parámetro de rigidez relativa para evaluar la relevancia de la interacción suelo-estructura.

Se observa que la interacción suelo-estructura es relevante para todos ellos y que para el 100% de los edificios de hormigón armado, el parámetro  $\phi$  es mayor que 0.2 mientras que esto ocurre para el 96% de los de mampostería.



manzana	edificio	N	h	P	Vs	rigidez relativa	manzana	edificio	N	h	P	Vs	rigidez relativa
830	1	4	13.76	0.22	175	0.35	870	8	7	24.08	0.32	200	0.37
830	2	7	24.08	0.32	175	0.43	870	9	8	27.52	0.35	200	0.39
830	3	7	24.08	0.32	175	0.43	870	10	9	30.96	0.38	200	0.41
830	8	9	30.96	0.38	175	0.47	870	11	9	30.96	0.38	200	0.41
830	9	8	27.52	0.35	175	0.45	870	14	7	24.08	0.32	200	0.37
830	12	7	24.08	0.32	175	0.43	870	15	8	27.52	0.35	200	0.39
830	13	1	3.44	0.10	175	0.19	900	6	8	27.52	0.35	225	0.35
830	17	7	24.08	0.32	175	0.43	900	7	7	24.08	0.32	225	0.33
830	18	8	27.52	0.35	175	0.45	900	8	8	27.52	0.35	225	0.35
830	19	8	27.52	0.35	175	0.45	900	9	8	27.52	0.35	225	0.35
830	20	8	27.52	0.35	175	0.45	900	10	8	27.52	0.35	225	0.35
830	22	3	10.32	0.19	175	0.31	900	12	8	27.52	0.35	225	0.35
830	23	8	27.52	0.35	175	0.45	900	13	8	27.52	0.35	225	0.35
830	24	7	24.08	0.32	175	0.43	900	15	3	10.32	0.19	225	0.24
830	27	8	27.52	0.35	175	0.45	900	16	2	6.88	0.15	225	0.20
830	28	8	27.52	0.35	175	0.45	900	23	7	24.08	0.32	225	0.33
830	29	7	24.08	0.32	175	0.43	900	24	1	3.44	0.10	225	0.15
840	1	3	10.32	0.19	150	0.36	900	25	4	13.76	0.22	225	0.27
840	2	7	24.08	0.32	150	0.50	920	4	7	24.08	0.32	250	0.30
840	3	7	24.08	0.32	150	0.50	920	10	1	3.44	0.10	250	0.13
840	4	7	24.08	0.32	150	0.50	920	12	7	24.08	0.32	250	0.30
840	5	7	24.08	0.32	150	0.50	920	17	6	20.64	0.29	250	0.28
840	6	6	20.64	0.29	150	0.47	920	18	10	34.40	0.41	250	0.34
840	7	7	24.08	0.32	150	0.50	920	20	8	27.52	0.35	250	0.31
840	8	7	24.08	0.32	150	0.50	920	24	3	10.32	0.19	250	0.22
840	9	7	24.08	0.32	150	0.50	920	26	9	30.96	0.38	250	0.33
840	10	6	20.64	0.29	150	0.47	930	5	8	27.52	0.35	250	0.31
840	11	7	24.08	0.32	150	0.50	930	7	8	27.52	0.35	250	0.31
840	12	7	24.08	0.32	150	0.50	930	8	7	24.08	0.32	250	0.30
840	15	1	3.44	0.10	150	0.22	930	9	7	24.08	0.32	250	0.30
840	16	7	24.08	0.32	150	0.50	930	11	7	24.08	0.32	250	0.30
840	17	7	24.08	0.32	150	0.50	930	12	7	24.08	0.32	250	0.30
840	18	5	17.20	0.26	150	0.44	930	14	7	24.08	0.32	250	0.30
840	22	7	24.08	0.32	150	0.50	930	15	7	24.08	0.32	250	0.30
840	23	8	27.52	0.35	150	0.52	930	16	2	6.88	0.15	250	0.18
840	26	1	3.44	0.10	150	0.22	930	17	4	13.76	0.22	250	0.24
870	2	10	34.40	0.41	200	0.42	930	20	3	10.32	0.19	250	0.22
870	3	10	34.40	0.41	200	0.42	930	21	7	24.08	0.32	250	0.30
870	4	8	27.52	0.35	200	0.39	930	22	5	17.20	0.26	250	0.27
870	6	1	3.44	0.10	200	0.16	930	23	5	17.20	0.26	250	0.27
870	7	4	13.76	0.22	200	0.31	930	26	6	20.64	0.29	250	0.28

**Tabla 6.4** Edificios de mampostería de Barcelona para los que se calculó el parámetro de rigidez relativa para evaluar la relevancia de la interacción suelo-estructura.

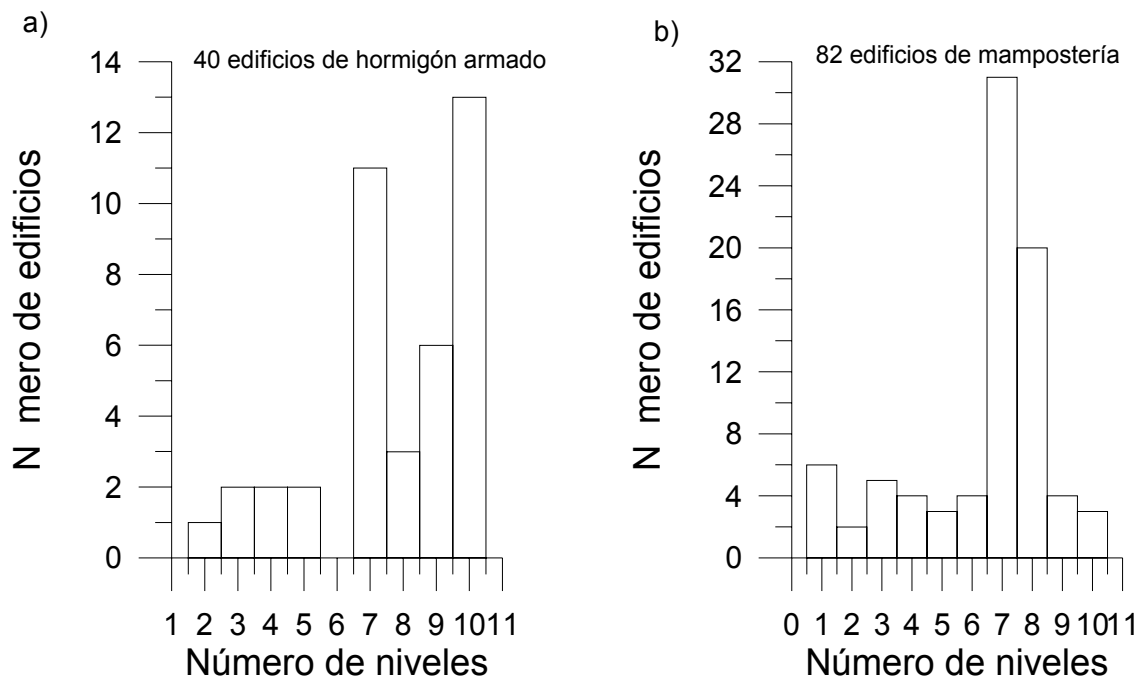
Para valores de  $\phi > 0.4$  el periodo del edificio con base flexible es mayor que el 40% de aquellos con base rígida, y esto ocurre para el 28 % de los edificios de hormigón armado y el 68% de los de mampostería. La Tabla 6.5 sintetiza estos resultados. La interacción suelo-estructura es más relevante para los edificios de mampostería que para los de hormigón armado.

		H	M
$\varphi > 0.05$	$P_F > P_R$	100%	100%
$\varphi > 0.20$	$P_F > 10\%$ de $P_R$	100%	96%
$\varphi > 0.40$	$P_F > 40\%$ de $P_R$	28%	68%
$\varphi > 0.45$	$P_F > 50\%$ de $P_R$	10%	20%

**Tabla 6.5** En base a los datos de las Tablas 6.3 y 6.4, y en la Figura 6.5, las dos últimas columnas de esta Tabla muestran el porcentaje de edificios de hormigón armado y mampostería para los cuales el periodo puede ser mayor del considerado (normalmente se supone la base rígida, pero cuando hay interacción suelo-estructura hay que suponer base flexible).

### 6.6 ANÁLISIS ESTADÍSTICO PARA INFERIR LA EXISTENCIA DEL EFECTO DE ISE

De la muestra de 122 edificios de Barcelona se obtienen las gráficas de la Figura 6.6 que presenta histogramas de la distribución del número de edificios, de hormigón armado y mampostería, en función del número de niveles. La mayoría de los edificios de mampostería (62%) son de 7 y 8 niveles siendo de 7 niveles la altura más utilizada mientras que para hormigón armado, 10 niveles es la moda en altura y el 61% de estos edificios son de 7 y 10 niveles (Tabla 6.6).

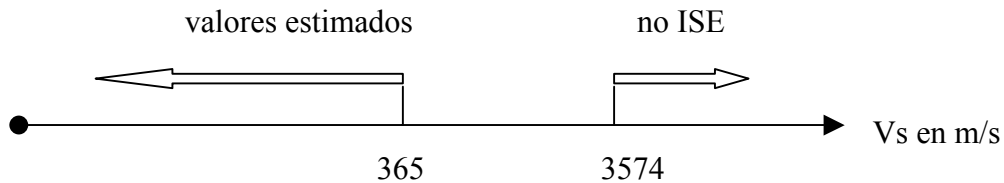


**Figura 6.6** Distribución de edificios de hormigón armado (a) y mampostería (b) tomados de una muestra arbitraria del Eixample de Barcelona.

Si extrapolamos los resultados anteriores a todos los edificios de Barcelona se tiene que la interacción suelo-estructura se consideraría relevante ( $\phi > 0.05$ ) para valores de  $V_s$  menores que los de la Tabla 6.6 y esto ocurriría para todos los edificios ya que el máximo valor estimado es 365 m/s.

N	H	M	Vs(H)	Vs(M)
7	28%	38%	3798	3763
8		24%		3931
10	33%		3574	

**Tabla 6.6** La mayoría de los edificios de hormigón de una muestra de 122 se distribuyen entre 6, 7 y 8 niveles de acuerdo con los porcentajes de esta tabla. Los valores de  $V_s$  (en m/s) corresponden, en edificios de hormigón y mampostería, a los mínimos para los cuales no habría interacción suelo-estructura.



El esquema anterior, sintetiza el hecho de que en la ciudad de Barcelona es esperable que ocurra interacción suelo estructura en todos los edificios situados en los puntos en los que se ha estimado la velocidad de las ondas de cizalla ya que 365 m/s es el máximo valor estimado (Cid, 1999) y 3574 m/s (Tabla 6.6) es el mínimo valor para el que no habría ISE.

## 6.7 PERIODOS DE EDIFICIOS Y DEL SUELO DONDE ESTÁN UBICADOS

A partir del sismo de México de 1985 se ha puesto interés en el fenómeno de resonancia y se busca determinar cuando los periodos de los edificios coinciden con el del suelo donde están situados. En la Ciudad de México ocurrió el efecto de amplificación del movimiento debido a los suelos blandos y además hubo acoplamiento de las frecuencias de los suelos y de los edificios.

En Barcelona se relacionaron los periodos del suelo con los de los edificios presentándose en la Tabla 6.7 los periodos en las direcciones longitudinal y transversal de 68 edificios medidos junto con el periodo predominante del suelo más cercano a cada edificio (en el caso de estar alejado se muestra el intervalo de los más próximos). Los datos de la Tabla 6.7 se complementan con la identificación del edificio, su tipología, el número de niveles y además, se señalan los tres casos descritos en el apartado 6.2 que relacionan los periodos del suelo y del edificio.

caso	ID	T	N	PS	P <sub>L</sub>	P <sub>T</sub>	caso	ID	T	N	PS	P <sub>L</sub>	P <sub>T</sub>
	2	H	15	*	0.63	0.63	1	95	H	8	0.83---1.25	0.31	0.36
1	8	H	9	1.25---2.00	0.36	0.32	2	96	E	9	0.27---0.69	0.42	0.40
2	14	H	6	0.05---0.80	0.28	0.28	2	97	E	13	0.27---0.69	0.60	0.57
1	15	M	4	0.50---1.25	0.26	0.31	2	98	E	6	0.27---0.69	0.30	0.28
1	16	M	4	1.35	0.27	0.27	2	99	E	6	0.27---0.69	0.28	0.26
1	17	M	5	0.50---1.25	0.21	0.32	2	101	H	8	0.14---0.69	0.40	0.34
1	18	M	6	0.40	0.21	0.23	1	102	M	4	0.69	0.28	0.24
2	20	M	6	0.07---1.43	0.19	0.22	1	103	H	4	0.69	0.27	0.25
1	21	M	6	0.89	0.28	0.29	1	104	H	4	0.69	0.32	0.28
1	26	M	8	0.89	0.30	0.39	1	105	H	7	0.14---0.33	0.45	0.45
1	27	M	8	0.83	0.29	0.33	2	106	H	4	0.14---0.33	0.23	0.39
2	28	M	8	0.06---0.50	0.48	0.48	1	107	M	6	0.83---1.25	0.39	0.43
1	29	M	9	1.00	0.36	0.30	1	108	M	3 o 6	0.83---1.25	0.21	0.18
1	30	H	11	1.25	0.52	0.52	1	109	M	5 o 9	0.83---1.25	0.60	0.40
1	39	H	10	0.90---1.67	0.40	0.40	1	110	H	9	0.60---1.35	0.46	0.42
2	41	H	10	0.33---0.90	0.36	0.28	2	111	H	5	0.20---0.70	0.29	0.17
1	42	H	10	0.70---1.00	0.38	0.42	1	112	H	4	0.60---1.35	0.26	0.26
1	43	H	12	0.70---1.00	0.57	0.60	1	113	H	4	0.78	0.17	0.22
1	49	H	9	1.00---1.25	0.30	0.42	1	114	H	6	1.11	0.32	0.20
2	50	H	7	0.20---0.29	0.31	0.23	3	115	H	6	0.29---0.33	0.38	0.37
1	51	M	5	0.96	0.28	0.27	2	116	H	3 o 5	0.06---1.10	0.35	0.25
1	52	M	8	1.10	0.38	0.50	1	117	M	4	1.00---2.00	0.28	0.37
1	53	H	8	1.25---2.00	0.40	0.30	1	118	M	4	1.10	0.24	0.25
1	59	H	10	1.25---2.00	0.35	0.43	1	119	H	2	0.50---1.00	0.20	0.19
1	68	H	10	0.89	0.29	0.39	1	120	H	2	0.77---1.00	0.13	0.11
1	72	M	7	0.70	0.27	0.27	1	121	H	3	1.25---1.54	0.24	0.22
2	77	H	3	0.14---0.20	0.28	0.20	1	122	M	2	0.90---1.10	0.10	0.10
2	78	H	4	0.14---0.20	0.33	0.19	1	123	H	2	1.25---1.54	0.11	0.09
2	79	H	4	0.14---0.20	0.33	0.19	1	124	H	9	1.00---1.43	0.40	0.40
1	81	H	6	1.25---1.71	0.39	0.35	1	125	M	3	0.67	0.16	0.23
1	83	M	2	0.40---0.50	0.11	0.12	1	126	M	2	0.50	0.16	0.12
3	87	M	9	0.30	0.36	0.34	1	127	M	1	0.50	0.10	0.12
1	88	H	8	0.50---1.00	0.27	0.31	3	128	E	*	1.71	4.17	4.17
1	89	H	9	0.67---1.00	0.37	0.29	1	129	M	10	1.00	0.38	0.38

**Tabla 6.7** Relación de los periodos fundamentales de 68 edificios medidos y de los periodos predominantes del suelo más cercanos a cada edificio.

Cuando se hace referencia al fenómeno de resonancia o acoplamiento de las frecuencias fundamentales del edificio con la predominante del suelo se debe considerar que, durante un sismo, el periodo del edificio aumenta más rápidamente que el periodo del suelo.

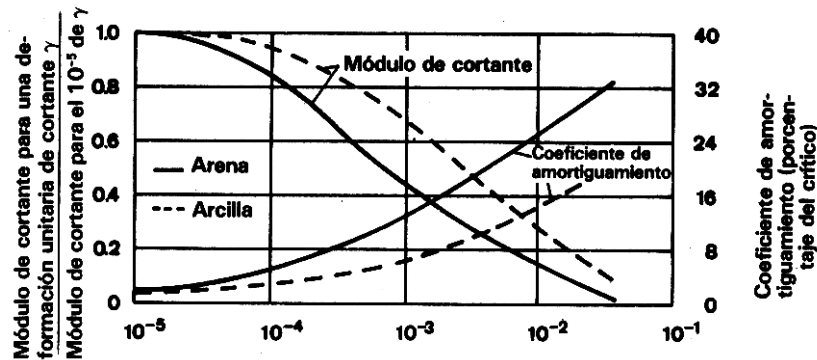
$$\frac{dP_e}{dt} > \frac{dP_s}{dt}$$

por lo que (durante el sismo) puede haber un intervalo de tiempo en el cual el periodo del edificio coincida con el del suelo ocurriendo esto principalmente para los 48 edificios del caso 1 (Tabla 6.7), esto es, para aquellos edificios con un periodo  $P_e$  que cumplen:

$$P_e < P_s$$

que sumados a los 16 del caso 2 son edificios donde se puede presentar el fenómeno de resonancia. En el caso 3 (Tabla 6.7), el 4% de los edificios, el periodo es mayor que el periodo del suelo y se puede considerar que durante un sismo no habrá resonancia.

Otro elemento que es importante para la existencia del efecto de ISE es el módulo de cortante del suelo ( $G$ ). En la Figura 6.7 se observa que este módulo disminuye a medida que aumenta la deformación de cortante del suelo, aumentando al mismo tiempo, el amortiguamiento lo que favorece la estabilidad de la estructura construida sobre este tipo de suelos.



**Figura 6.7** Curvas de la degradación del módulo de cortante y del aumento del amortiguamiento para dos tipos de material constituyentes de suelos, arena y arcilla, en función de la deformación. El eje horizontal representa la deformación unitaria de cortante  $\gamma$  en porcentaje (Wakabayashi y Martínez, 1988).

Podemos resumir diciendo que:

Durante un terremoto  $\gamma$  aumenta  
 $G$  disminuye  
 $V_s$  disminuye,  
 $\phi$  aumenta

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\text{densidad}}}$$

por lo que durante un sismo la ISE puede afectar más edificios que en situaciones de baja deformación (vibración ambiental o caso estático).

## **6.8 CONCLUSIONES**

El cálculo del apartado Sección 6.5 es una aplicación valiosa de los resultados del Capítulo 5, ya que permite estimar la importancia de la interacción suelo-estructura para todos los edificios de Barcelona y al extrapolar a toda Barcelona se encuentra que esta interacción es relevante para la mayoría de sus edificios. Esta estimación es bastante optimista ya que el efecto de ISE es más importante cuando ocurre un sismo al variar las condiciones del suelo, deformación, módulo de cortante, coeficiente de amortiguamiento y rigidez relativa.

Por otro lado, se debe tomar en cuenta que la interacción suelo-estructura aumenta el valor del periodo y ésta es una de las razones por las que durante un sismo el periodo es mayor que el medido con vibración ambiental. Este fenómeno nos lleva a concluir que aunque los periodos del suelo y del edificio difieran, no se debe desechar el fenómeno de resonancia hasta no evaluar el efecto de interacción suelo-estructura, sobre todo porque este efecto es importante para muchos edificios de Barcelona (Tablas 6.2, 6.3 y 6.4)

Así, el periodo fundamental de un edificio varía durante un sismo si el comportamiento de un edificio 1) entra al campo no lineal y 2) si está en el campo lineal y el efecto de interacción suelo-estructura es relevante.